

Impact des modèles de comportement sur la modélisation des ouvrages souterrains

Yousef HEJAZI, Daniel DIAS & Richard KASTNER

INSA de Lyon
LGCIE Site Coulomb 3
69621, Villeurbanne, France
yousef.hejazi@insa-lyon.fr

Résumé :

La prédiction des tassements en surface étant un élément clé lors de l'exécution des travaux souterrains en milieu urbain, il est donc nécessaire d'utiliser des lois de comportement adaptées au calcul des ouvrages géotechniques en phase de service.

Dans cet article, des modèles de comportement à différents niveaux de complexité sur des argiles surconsolidées sont mis en oeuvre. L'étude ne repose pas sur un chantier réel mais les paramètres mécaniques sont déduits d'essais triaxiaux puis utilisés pour la modélisation du creusement d'un tunnel peu profond en déformations planes. L'impact des modèles de comportement est ainsi mis en évidence sur les déplacements au sein du massif.

Abstract :

The prediction of the surface settlements is a key element during the execution of an underground work, it is thus necessary to use adapted constitutive models to the design of the underground works during their use.

In this article, constitutive models at various complexity levels on overconsolidated clays are used. The study does not present a real site but the mechanical parameters are deduced from triaxial compression tests and then used for the modeling of the excavation of a shallow tunnel in plane strain. The impact of the constitutive model is thus highlighted on displacements within the soil.

Mots-clefs : Modèles de comportement ; modélisation numérique ; ouvrages souterrains

1 Introduction

En milieu urbain, l'estimation de l'influence du creusement d'un tunnel sur les bâtiments avoisinants est un aspect économique et environnemental important. En effet, la perte de volume en tunnel se répercute en surface, créant des mouvements de sol susceptibles d'affecter de manière plus ou moins importante les structures en surface.

L'interaction entre les structures existantes et les ouvrages souterrains est un phénomène complexe où le comportement du massif environnant représente un des aspects du problème de creusement. Toutefois, un modèle réaliste pour le sol est un élément essentiel afin de prévoir les magnitudes et la distribution des déformations.

Le modèle de comportement fréquemment utilisé lors de la simulation numérique du creusement des ouvrages souterrains est élastique linéaire parfaitement plastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb. En général, son utilisation conduit à des cuvettes de tassement moins profondes et plus larges que celles observées expérimentalement. Afin de prendre en compte certains des aspects fondamentaux du comportement des sols tels que la dilatance avant rupture, la variation du module en fonction de l'état de contrainte, un module en

déchargement différent de celui en chargement, il convient donc d'utiliser un modèle élastoplastique avec écrouissage isotrope. Pour une analyse des tassements, il apparaît également nécessaire de tenir compte de la variation du module des sols à faible déformation. Afin de mieux modéliser le comportement de l'argile surconsolidée lors de creusement des tunnels, Boháč et al. (2002), Mašin et Herle (2005) et Addenbrooke et al. (1997) étudient l'influence de l'utilisation des différentes lois de comportement à différents niveaux de complexité comprenant le radoucissement (après le pic), la non linéarité avant rupture ou encore l'anisotropie sur les déformations autour des tunnels. Ils mettent tous l'accent sur l'importance de la prise en compte de la non linéarité du terrain dans les modèles numériques.

Dans cet article, trois modèles de comportement sont mis en œuvre dans une simulation bidimensionnelle de creusement d'ouvrage souterrain en déformations planes : un modèle élastique linéaire parfaitement plastique (modèle de Mohr-Coulomb), un modèle élastoplastique avec écrouissage isotrope (Hardening Soil Model, Schanz et al., 1999) et une évolution de ce modèle prenant en compte l'évolution du module de cisaillement en fonction du niveau de déformation (Hardening Soil Small, Plaxis, 2006). L'étude se base sur les résultats des essais triaxiaux représentant une argile surconsolidée (Gasparre, 2005), elle est ensuite appliquée à un creusement de tunnel peu profond. L'influence du modèle choisi est mise en évidence en terme de tassements et de déplacements horizontaux.

2 Modèles de comportement

Les lois de comportement utilisées dans les modélisations sont brièvement décrites :

2.1 Modèle de Mohr-Coulomb (MC)

Pour la modélisation de l'élasticité linéaire parfaitement plastique, on utilise le modèle de Mohr-Coulomb avec ses cinq paramètres : les paramètres élastiques, E (module d'Young) et ν (module de Poisson), et les paramètres plastiques ϕ (angle de frottement interne), c (cohésion), et ψ (angle de dilatance).

2.2 Modèle Hardening Soil Model (HSM)

Le modèle HSM, dérivé du modèle hyperbolique de Duncan-Chang (1970) car il en reprend, en les améliorant, les formulations hyperboliques et est adapté à tous les types de sols. La surface de charge est décrite par deux mécanismes avec écrouissage isotrope contrôlant respectivement les déformations volumiques et déviatoriques (Figure 1).

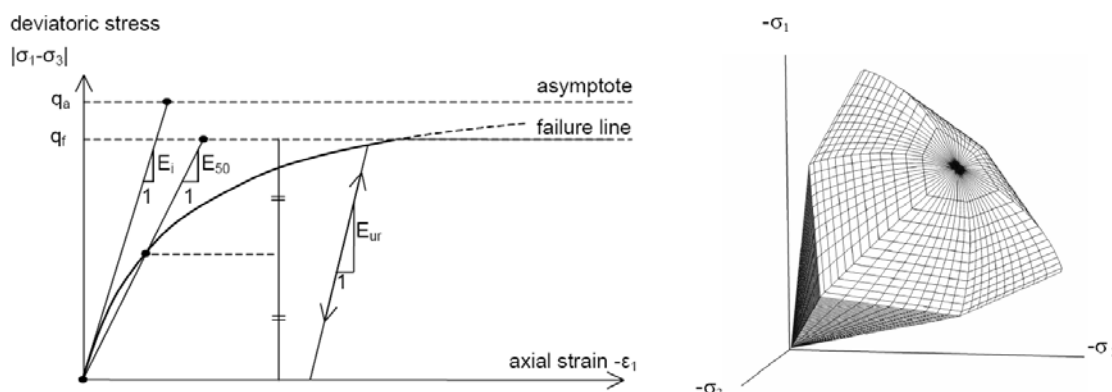


FIG. 1 – Relation contrainte/déformation et surface de charge (d'après Schanz et al., 1999).

Les paramètres d'entrée sont :

- les paramètres de résistance ϕ , c , et ψ .
- la rigidité du sol est définie par les paramètres E_{50}^{ref} caractérisant le cisaillement, E_{oed}^{ref} qui contrôle le comportement volumique et E_{ur}^{ref} le module de déchargement-rechargement, avec un paramètre m de type Janbu (1963) qui contrôle la dépendance contrainte/rigidité selon une fonction de puissance.

La description complète du modèle est donnée par Schanz et al. (1999).

2.3 Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall)

Le modèle HSsmall est une évolution du modèle HSM. Cette modification prend en compte l'évolution du module de cisaillement en petites déformations. A faible niveau de déformations ($< 10^{-5}$), les sols possèdent une rigidité plus élevée que celle couramment utilisée pour dimensionner les ouvrages qui est déduite d'essais triaxiaux classiques (niveau de déformations $> 10^{-3}$). Cette rigidité en cisaillement se dégrade d'une façon non linéaire avec les déformations. Ce comportement est décrit par le modèle HSsmall en utilisant deux paramètres supplémentaires : G_0 , le module en petites déformations et $\gamma_{0.7}$, le niveau des déformations où le module de cisaillement est réduit à 70% de sa valeur initiale.

3 Calage des paramètres

Les simulations sont basées sur une campagne intensive d'essais en laboratoire et in situ. Ces expérimentations permettent de caractériser l'argile surconsolidée de Londres (Gasparre, 2005). Les échantillons retenus concernent l'exécution du Terminal 5 de l'aéroport de Heathrow (Londres). Selon la coupe géologique de cette zone, on distingue la lithographie suivante : une couche de graviers pouvant aller jusqu'à 2.5 m de profondeur. Au-dessous de cette couche, se trouve une couche d'argile dont on peut distinguer trois unités lithologiques différentes. Afin de simplifier le modèle, on ne prend en compte qu'une seule couche dont les paramètres représentent une argile moyenne. La figure 2 montre la dégradation du module d'Young en fonction du niveau des déformations axiales pour les deux échantillons dont les profondeurs sont 18 m et 20 m respectivement. Cette figure montre également les courbes numériques correspondantes aux paramètres retenus pour les modèles de comportements cités dans le paragraphe précédent. Les chemins de contraintes suivis sont donnés par Gasparre 2005. Les paramètres retenus pour les trois modèles de comportement sont donnés dans le tableau 1. A 73 m de profondeur se trouve le substratum.

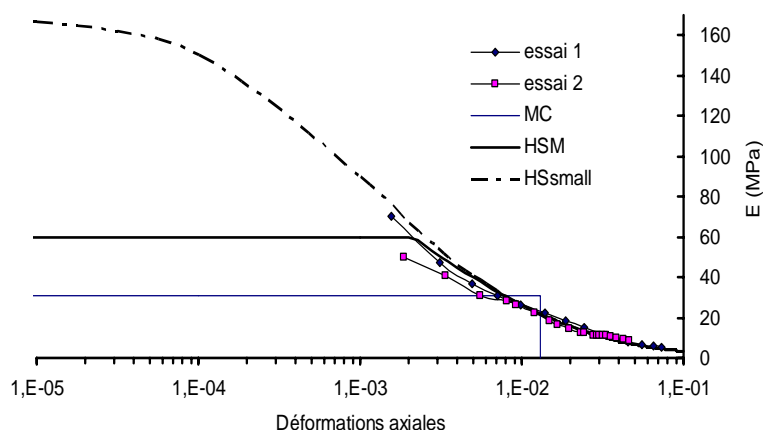


FIG. 2 – Calage des paramètres des différents modèles à partir des essais triaxiaux.

Tableau 1 – Les paramètres retenus pour les trois modèles de comportement

Modèle	C kN/m ²	φ (°)	ψ (°)	ν	E kN/m ²	E_{50}^{ref} kN/m ²	E_{oed}^{ref} kN/m ²	E_{ur}^{ref} kN/m ²	m	G_0 kN/m ²	$\gamma_{0.7}$
MC	7	20,5	4,81	0,28	31×10^3	-	-	-	-	-	-
HSM	7	20,5	4,81	0,28	-	$32,5 \times 10^3$	$32,5 \times 10^3$	$97,5 \times 10^3$	0,5	-	-
HSsmall	7	20,5	4,81	0,28	-	$32,5 \times 10^3$	$32,5 \times 10^3$	$97,5 \times 10^3$	0,5	65×10^3	10^{-4}

4 Simulation numérique

La simulation numérique du creusement d'un tunnel peu profond a été effectuée à l'aide du code de calcul en éléments finis Plaxis2D, un modèle en déformations planes a été créé. La nappe phréatique se situe à 2.5 m de profondeur. L'étendue du maillage (figure 3) est de 100 m de longueur et le tunnel est situé à $H = 53,75$ m du substratum (profondeur supposée constante). Le tunnel est circulaire et son diamètre est de $D = 7,7$ m. La hauteur de couverture pour le calcul de référence est de 2D.

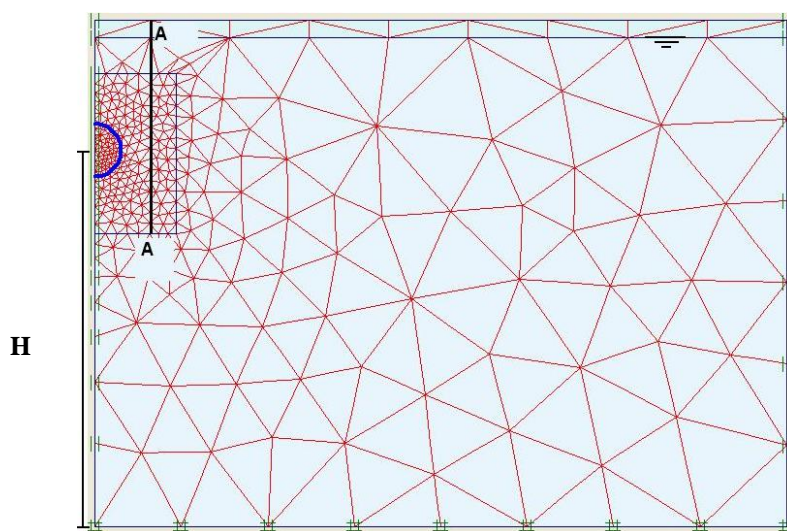


FIG. 3 – Géométrie et maillage en éléments finis.

Karakus (2007) compare différentes façons d'aborder les effets d'un creusement tridimensionnels dans un modèle bidimensionnel, il conclue que la méthode convergence-confinement (Panet, 1995) permet d'obtenir une bonne estimation de la cuvette de tassement. La détermination de la convergence du massif au moment où le soutènement devient efficace, c'est-à-dire au moment où il commence à exercer une pression de soutènement pour s'opposer à la convergence, est une démarche essentielle de la méthode convergence-confinement (Panet, 1995). Le choix de la valeur correspondante du paramètre de déconfinement λ_d constitue une des difficultés de l'application de la méthode convergence-confinement. La valeur adoptée pour le calcul de référence est de 35%.

La simulation numérique se fait ainsi en deux phases :

- désactivation du terrain excavé en appliquant simultanément un taux de déconfinement λ_d sur les pourtours de l'excavation,
- activation du soutènement et déconfinement total.

Autour du calcul de référence, des calculs supplémentaires ont ensuite été effectués pour obtenir l'influence de divers paramètres :

- le modèle de comportement (MC, HSM et HSsmall) ;
- la hauteur de recouvrement au-dessus de la clé du tunnel de 1D à 5D ;

5 Résultats de la modélisation

5.1 Calcul de référence ($H = 2D$ et $\lambda_d = 35\%$)

Les cuvettes de tassement ainsi que les déplacements horizontaux correspondants (suivant la coupe A-A – figure 3) résultants des simulations numériques sont présentés sur la figure 4.

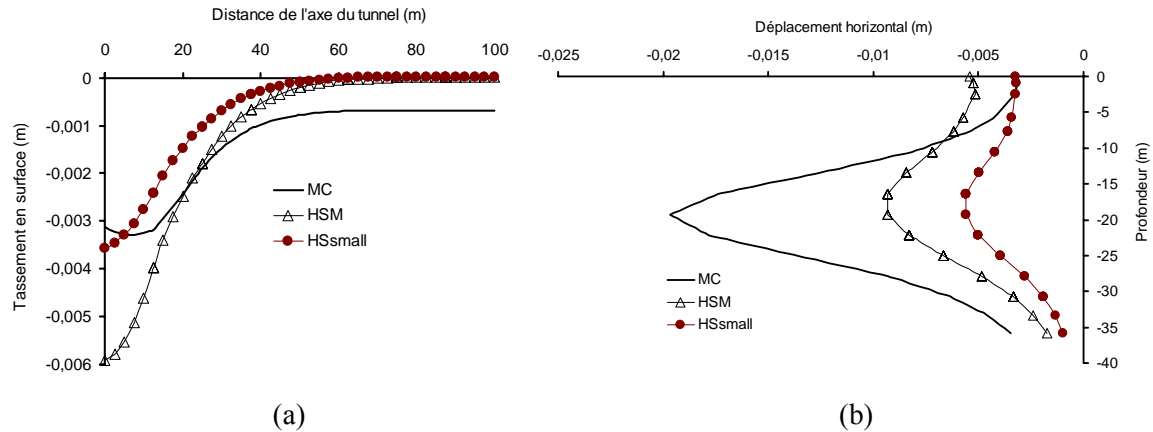


FIG. 4 – (a) Tassement en surface; (b) Déplacements horizontaux suivant un inclinomètre 1D loin de l'axe. – (Calcul de référence)

L'impact du modèle de comportement se manifeste par une différence de réponse en terme de mouvements. Malgré une extension longitudinale de maillage conséquente, on remarque qu'en utilisant le modèle MC, on observe encore des tassements (figure 4a) à 100 m de l'axe, ce qui semble irréaliste. Ce problème peut être justifié par le fait que même dans les zones de faibles déformations, le module de cisaillement dans le modèle MC soit constant. Le modèle basé sur une rigidité plus élevée en petites déformations s'approche le plus des observations expérimentales (cuvette de tassement plus profonde et moins large, Addenbrooke et al., 1997) à l'inverse du modèle Mohr-Coulomb qui induit une cuvette qui ne correspond pas à l'équation de Gauss. On observe également 40% de différence entre le tassement maximal estimé par le HSM et le HSsmall, ce qui montre l'importance de la prise en compte de la variation du module de cisaillement.

En ce qui concerne le déplacement horizontal au niveau du centre de tunnel (figure 4b), HSM fournit un déplacement 65% plus grand que celui prédit par HSsmall. Toutefois, le modèle MC s'éloigne des deux modèles avec une valeur 290% plus élevée que celle observée par HSsmall modèle.

5.2 Etude de sensibilité

Pour évaluer l'influence du recouvrement au-dessus de la clé sur les déplacements, des calculs ont été effectués pour $\lambda_d = 35\%$ et une couverture variable entre 1D et 5D (figure 5). Suivant le modèle MC, on observe un soulèvement pour les faibles profondeurs ($<1,5D$). Puis pour une hauteur de couverture supérieure à 1,5D, on observe que le tassement augmente avec la profondeur, ce qui semble irréaliste. En effet, les effets voûte autour d'un tunnel limitent la propagation des mouvements en surface c'est donc le phénomène inverse qui aurait dû être observé. A l'inverse de MC, les deux autres modèles prédisent des tassements qui décroissent avec la profondeur tout en conservant une différence importante (55%).

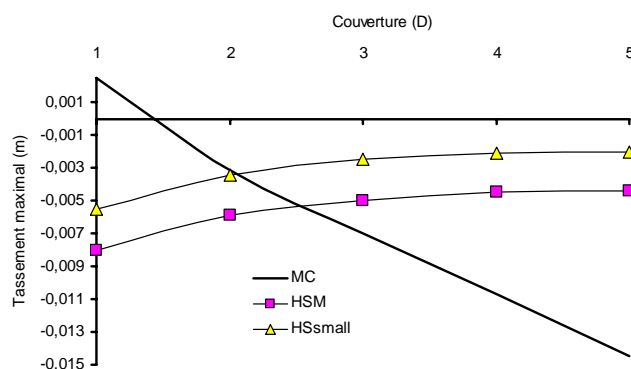


FIG. 5 – Influence de la profondeur sur les tassements en surface.

6 Conclusions et perspectives

L'analyse paramétrique menée dans cette communication permet de mettre en évidence l'influence du choix de la loi de comportement sur la simulation d'un ouvrage souterrain dans une argile surconsolidée. Cet article montre que l'utilisation d'un modèle de comportement adapté au problème du creusement d'un ouvrage souterrain (qui comprend la non linéarité et la rigidité en très petites déformations) améliore sensiblement la prédiction des déplacements autour de l'ouvrage.

Ce travail doit encore être complété par une étude de l'incidence du taux de déconfinement et des modèles de comportement basés sur le modèle Cam-Clay (Mašin et Herle, 2005). La comparaison à des résultats expérimentaux sur un ouvrage réel permettra également de mettre en évidence les phénomènes importants à prendre en compte dans la modélisation du creusement d'un ouvrage souterrain.

Références

- Addenbrooke, T. I., Potts, D. M. & Puzrin, A. M. 1997. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Géotechnique* 47(3), pp. 693-712.
- Boháč, J., Herle, I. & Mašin, D. 2002. Stress and strain dependent stiffness in a numerical model of a tunnel. *Proc. 2nd Int. Conférence on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering*. Zurich, Switzerland, pp. 357-364
- Duncan, J. M. & Chang, C. Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 96, pp. 1692-1653.
- Gasparre, A. 2005. Advanced laboratory characterisation of London clay. *PhD Thesis*, Imperial College London. 598 pp.
- Janbu, N. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *European conf. on soil mechanics and foundation engineering*. Wiesbaden, Germany, Vol. 1, pp. 19-25.
- Karakus, M. 2007. Appraising the methods accounting for 3D tunnel effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 22 (2007) pp. 47-56.
- Mašin, D. & Herle, I. 2005. Numerical analyses of a tunnel in London clay using different constitutive models. *Proc. 5th Int. Symposium TC28 Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 595-600.
- Panet, M. 1995. Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. *Presses de l'ENPC*, Paris.
- Plaxis, 2006. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 2D version 8.4. Material Models Manual.
- Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier P. G. 1999. Formulation and verification of the Hardening-Soil Model. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, pp. 281-290.